

Metodología para la manufactura de implantes craneales a partir de imágenes DICOM y tecnologías CAD/CAM/CNC¹

Carlos Rodríguez², Iván López³, Alejandro Sierra⁴ y Jairo Maya⁵

Recepción: 06 de octubre de 2004 — Aceptación: 01 de septiembre de 2005

Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

El presente artículo propone una metodología para el diseño y la fabricación de implantes craneales a partir de imágenes DICOM y tecnologías CAD/CAM/CNC. Esta metodología parte de las Tomografías Axiales Computarizadas (TAC) de la cabeza del paciente, con las cuales se lleva a cabo la reconstrucción tridimensional del cráneo. Luego, en el sistema CAD se reconstruye el implante variando la técnica empleada dependiendo de la región del cráneo con defecto o trauma. Una vez obtenido el modelo, se diseña el montaje y se fabrica el implante con soporte en tecnología CAM/CNC.

Palabras claves: implante de cráneo, sistemas CAD/CAM/CNC, DICOM.

Abstract

It's proposed a methodology in order to design and manufacture cranial implants using DICOM and CAD/CAM/CNC technologies. This methodology begins when the designer makes a three-dimensional cranial reconstruction using the Axial Computer Tomographies (ACT) of the patient's cranium. Next, using a CAD system, the designer rebuilds the implant varying the used technique depending on the affected region. Finally, the designer builds the assembling and manufactures the implant.

Key words: medical cranial implants, CAD/CAM/CNC systems, DICOM.

¹ Proyecto de Grado, Mención de Honor del Departamento de Ingeniería de Producción, año 2003. Segundo lugar Premio Nacional Otto de Greiff, versión 2003-2004, área Ciencias de la Salud. Trabajo realizado con el apoyo de la Escuela de Ingeniería de la Universidad EAFIT.

² Especialista en Procesos de Transformación del Plástico y del Caucho, carodri@eafit.edu.co, profesor asistente, Universidad EAFIT.

³ Ingeniero de Producción, ilopezgo@eafit.edu.co, investigador del Instituto de Investigación del Plástico y del Caucho (ICIPC), Universidad EAFIT

⁴ Ingeniero de Producción, asierra4@eafit.edu.co, Gerente Comercial, Representaciones C.G.S.A.

⁵ Magister, jmaya@eafit.edu.co, profesor investigador, Universidad EAFIT.

1 Introducción

La utilización de implantes para reemplazar partes del cuerpo humano perdidas por causas como traumas, defectos congénitos, infecciones, tumores, cirugías, entre otros, es posible gracias al desarrollo de las ciencias médicas, los avances en las tecnologías de procesamiento de imágenes, los adelantos en las técnicas de diseño y manufactura, y la investigación sobre materiales biocompatibles. Sin embargo, las bondades de los adelantos biomédicos en lo que se refiere a la fabricación de implantes, por los altos costos que involucra, no están al alcance de las personas con menor poder adquisitivo, lo que las deja destinadas únicamente a su utilización masiva en los países más desarrollados y a su aplicación para unos pocos pacientes en los países de menor desarrollo.

Una de las formas de abaratar los costos en la masificación de implantes en nuestro medio, es la de adoptar las técnicas y tecnologías empleadas en diseño y fabricación a nivel mundial.

Actualmente, en Colombia, hay carencias en el diseño y la manufactura de implantes craneales, teniéndose que importar de países que sí cuentan con las tecnologías adecuadas, lo que eleva considerablemente los costos y aumenta los riesgos del paciente al tener que esperar más tiempo para recibir el implante. En Colombia existen algunos de los recursos para fabricarlos, el problema radica en la falta de conocimiento y metodologías para hacerlo.

Una alternativa viable, con los recursos y desarrollos tecnológicos que tiene Colombia para el diseño y la fabricación de implantes craneales, es hacerlo con el soporte de tecnologías CAD/CAM/CNC.

2 Técnicas y metodologías empleadas para el diseño y la fabricación de implantes craneales

El desarrollo tecnológico, en lo que se refiere a nuevos materiales y técnicas de diseño y manufactura, brindan diversas alternativas. A continuación se mencionan las de mayor relevancia.

2.1 Diseño y fabricación de implantes craneales a partir de materiales de relleno

Estas técnicas tienen como base el empleo de materiales particulados o de relleno que son vaciados en el área correspondiente a la zona afectada del cráneo. Este tipo de materiales se puede curar o solidificar con fluidos corporales para que posteriormente tomen la forma correspondiente del cráneo, dependiendo del espesor de la capa adicionada de material particulado [5]. Esta técnica es recomendable únicamente cuando la zona afectada es relativamente pequeña, entre 4 y 7 cm^2 aproximadamente, dado que el implante resultante

no presenta alta resistencia al impacto, y no se garantiza un alto nivel de ajuste a la forma del cráneo cuando el trauma o defecto es de gran tamaño.

2.2 Diseño y fabricación de implantes craneales a partir de materiales moldeables

Esta técnica se basa en la utilización de un parche elaborado con materiales que al calentarlos se hacen moldeables. Esto permite al diseñador darle la forma requerida para que se ajuste a la región del cráneo afectada. Una vez que el material se enfría, el implante adquiere rigidez manteniendo la forma definida. Esta técnica es recomendable cuando el defecto craneal es de tamaño pequeño a mediano [5].

2.3 Diseño y fabricación de implantes de cráneo a partir de preformas de sectores craneales

Diversas empresas fabrican en forma masiva preformas de sectores craneales para ser utilizadas en la construcción de implantes. El modelo de la preforma es escogido según el sector que presenta el defecto y el tamaño del cráneo del paciente. La utilización de preformas sólo es recomendable cuando el tamaño del defecto es considerablemente grande, ya que éstas se consiguen sólo para amplios sectores del cráneo, como es el caso de un hemisferio completo. Con este método no se garantiza un buen ajuste superficial entre el implante y el cráneo, y el éxito de la cirugía dependerá en gran medida de la habilidad del cirujano para ajustar la preforma a la zona afectada.

2.4 Implantes fabricados con el soporte de tecnologías CAD/CAM/CNC

La utilización de tecnologías CAD/CAM/CNC permite obtener implantes de cráneo de forma y geometría personalizada, ya que se parte de las tomografías computarizadas de cada paciente.

La geometría del implante se puede obtener a partir de dos técnicas distintas:

Prensado de lámina: se diseña, con la ayuda de la tecnología CAD/CAM, un molde con la parte negativa del implante en material cerámico de alta resistencia a la compresión. Una lámina de material biocompatible fácilmente moldeable es depositada sobre el molde cerámico, para formar con una prensa hidráulica la geometría del implante presionando la lámina contra la cavidad del molde [1].

Maquinado directo: se diseña el implante con la ayuda de la tecnología CAD/CAM. Para la fabricación del implante se parte de un bloque sólido hecho de un material biocompatible, maquinable. Sobre el bloque se realizan operaciones de desbaste y acabado superficial con la ayuda de la tecnología CAM/CNC, hasta obtener el implante final [2].

3 Metodología para obtener un implante craneal con el soporte de tecnologías DICOM y CAD/CAM/CNC

En la figura (1) se muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta para desarrollar un implante. A continuación se describen los pasos más relevantes.

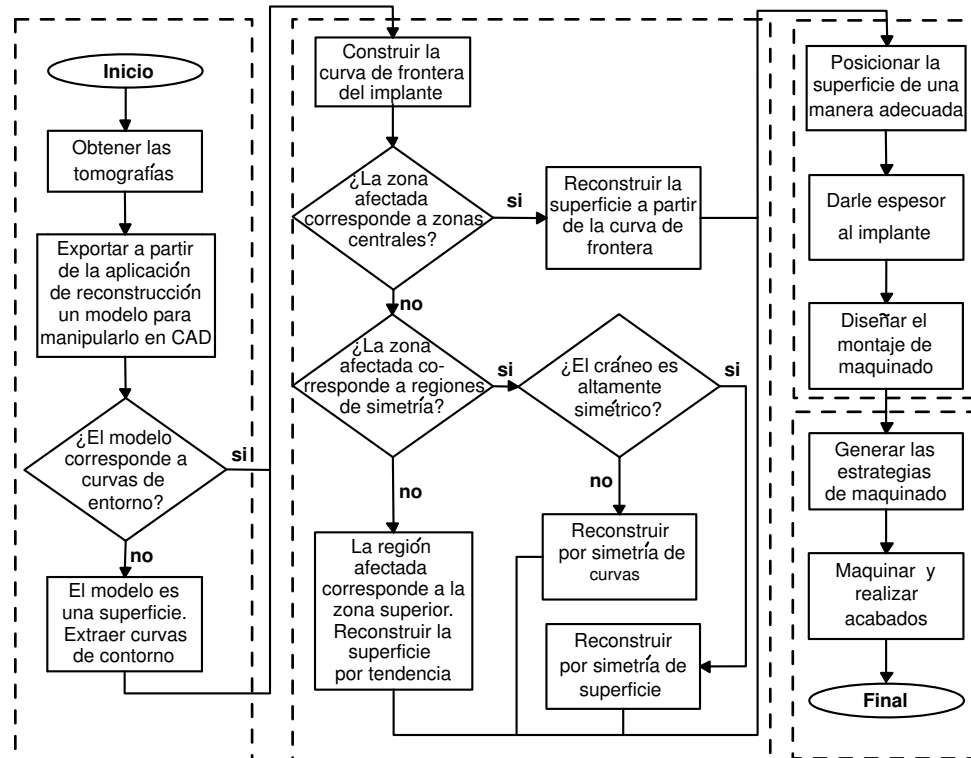


Figura 1: Secuencia metodológica para obtener la aproximación a un implante craneal

3.1 Obtención de las tomografías

Como información entrante para el diseño y la fabricación de implantes de cráneo se utilizan imágenes digitales tipo DICOM. DICOM es un estándar para la comunicación de imágenes médicas y su información asociada. Este tipo de imágenes puede obtenerse a partir de diferentes técnicas, tales como las tomografías computarizadas, la resonancia magnética, la medicina nuclear y el ultrasonido [3], [6], [7], [8], [9].

3.2 Reconstrucción del modelo tridimensional del cráneo

Para obtener el modelo tridimensional del cráneo a partir de las TAC tomadas al paciente, se utiliza una aplicación de reconstrucción tridimensional médica. Con estas aplicaciones se pueden exportar, en tres presentaciones diferentes, los modelos del cráneo estudiado:

- Curvas de contornos del cráneo (figura 2).
- Superficies con representación poligonal del cráneo (figura 2).
- Superficies suavizadas del cráneo.

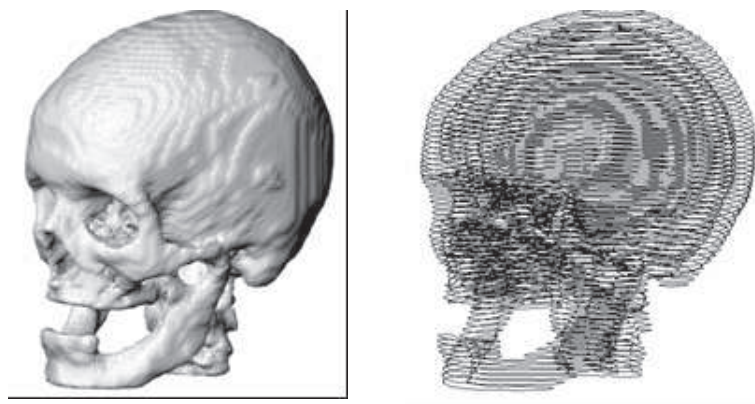


Figura 2: Superficie con representación poligonal del cráneo y curvas de contorno

En última instancia, para la metodología se requieren las curvas de contorno. En caso de haber obtenido modelos de superficie, se requiere extraer las curvas por medio de una herramienta CAD.

3.2.1 Reconstrucción de la superficie correspondiente al implante

El problema de la reconstrucción de un implante se aborda en dos fases: la de la curva de frontera y la de la superficie del cráneo.

1. Reconstrucción de la curva de frontera del implante craneal: una vez extraídas las curvas de contorno del cráneo, a partir de las tomografías, se procede a obtener la curva de frontera del implante, dibujando en un sistema CAD una curva tridimensional que pase por los puntos finales de las curvas de contorno en la zona afectada. En la figura (3) se muestra la reconstrucción de la curva de frontera que delimita el área afectada.

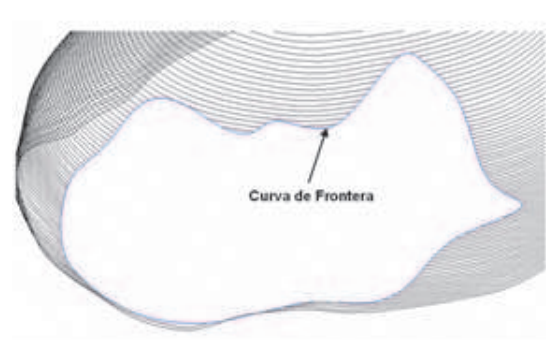


Figura 3: Reconstrucción de la curva de frontera

2. Reconstrucción de la superficie del implante: la reconstrucción de la superficie del implante, para la metodología propuesta, depende de la ubicación de la zona afectada en el cráneo, dividida en tres casos diferentes, como se muestra en la figura (4): zona superior, zonas centrales y zonas de simetría. Para cada caso corresponde una técnica diferente.

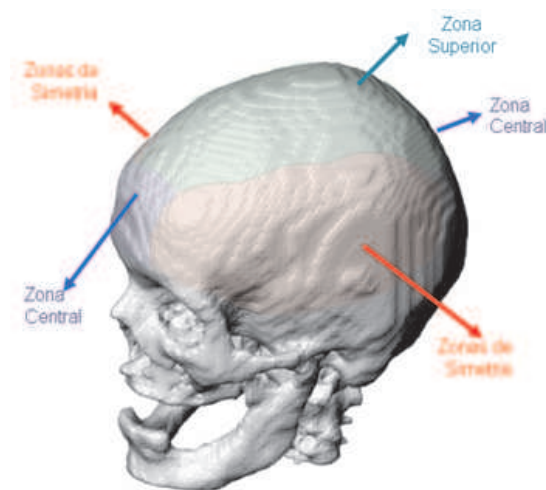


Figura 4: Zonas de reconstrucción acorde con la ubicación en el cráneo

- (a) Reconstrucción de la superficie del implante cuando la zona afectada es la parte superior del cráneo: como la geometría de la zona superior del cráneo presenta un comportamiento suave y sin cambios bruscos de curvatura, es posible realizar una reconstrucción del área dada a través de las curvas de contorno. Para esto se construye una superficie no recortada a partir de dichas

curvas. En este tipo de superficie, cuando hay una región sin información de curvas, se obtiene la información a partir de las curvas anteriores y posteriores a la zona afectada.

Como último procedimiento se recorta la superficie con la curva de frontera. En la figura (5) se muestra la superficie final del implante obtenida por este método.

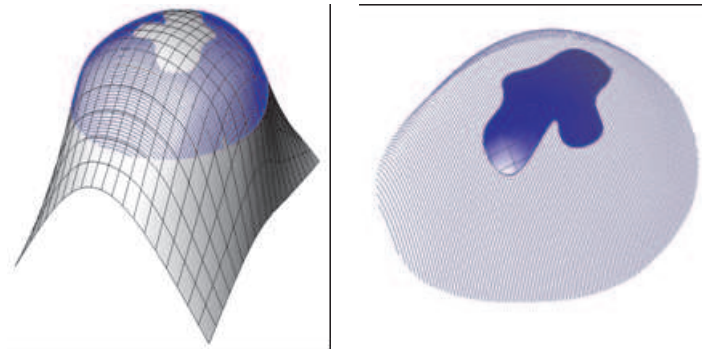


Figura 5: Reconstrucción de la superficie cuando la región afectada es la zona superior

- (b) Reconstrucción de la superficie del implante cuando la zona afectada corresponde a una región de simetría: para estos casos se procede a obtener la información superficial del hemisferio afectado a partir del hemisferio opuesto, dando como resultado un implante con un alto grado de detalle.

En esta metodología se toman una a una las curvas de contorno. Se identifica la zona afectada en cada curva buscando el tramo simétrico en el hemisferio no afectado. Luego se hace una copia simétrica de dicho tramo en el hemisferio afectado. Finalmente, se ajusta la curva para generar un contorno cerrado y tangente en los puntos de unión, como muestra la figura (6).



Figura 6: Reconstrucción de los contornos por simetría

Este procedimiento se repite para cada uno de los contornos. En este punto se ha logrado que todas las curvas de contorno del cráneo sean cerradas, lo que permite generar, por medio de una herramienta CAD, la reconstrucción completa de toda la superficie craneal. Finalmente, se procede a cortar la superficie craneal con la curva de frontera. Una superficie de un implante obtenida por este método se muestra en la figura (7).

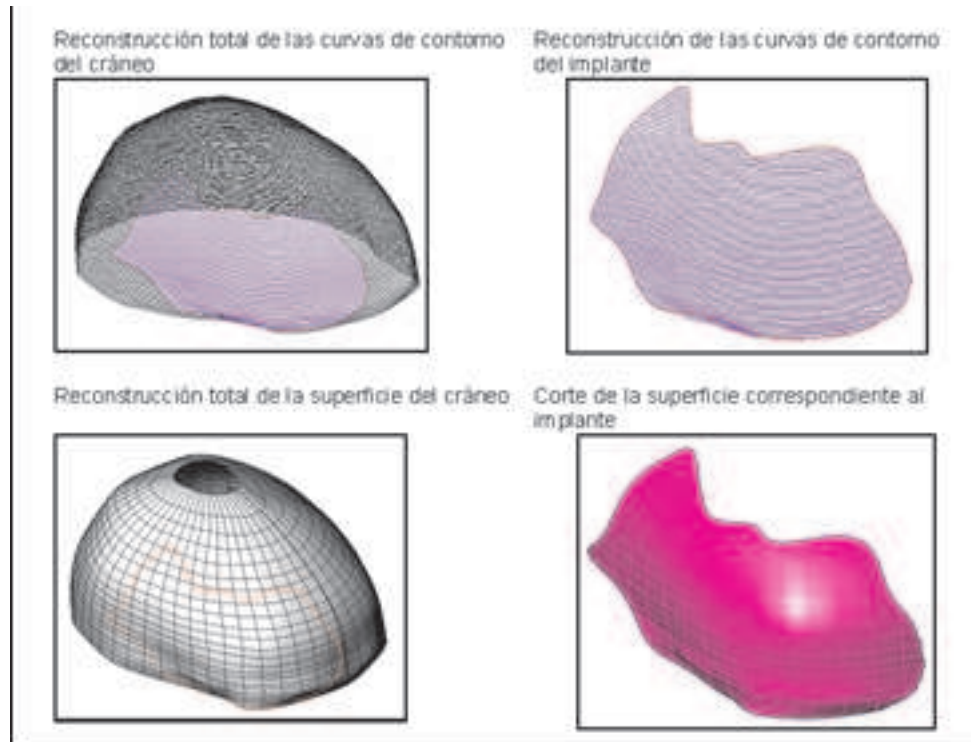


Figura 7: Reconstrucción por simetría de curvas

- (c) Reconstrucción de la superficie del implante cuando la región afectada corresponde a la zona central: la reconstrucción realizada por la curva de frontera es un método aplicable a cualquiera de las zonas del cráneo. Sin embargo, no es la más recomendable ya que no garantiza una transición suave y tangencial entre la superficie del cráneo y la superficie del implante. Adicionalmente, la calidad final del implante dependerá en gran medida del diseñador. El implante diseñado por esta metodología garantiza un perfecto ajuste entre la curva de frontera del implante y la zona craneal afectada, aunque no pasa lo mismo con la tendencia de las superficies. En la figura (8) se muestra un ejemplo.

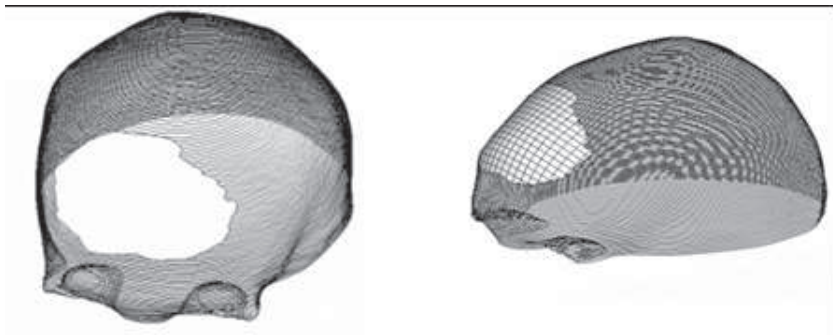


Figura 8: Reconstrucción de la superficie de un implante en la zona central

3.2.2 Diseño del montaje para maquinar el implante

1. Posicionamiento de la superficie dentro del montaje: la ubicación espacial para el maquinado se convierte en uno de los problemas fundamentales por resolver a la hora de darle mejor utilización a los recursos empleados durante el proceso de fabricación. Dependiendo de la posición del implante se afectan las siguientes variables:

- Cantidad de material a emplear: en caso de usarse materiales de alto costo para fabricar el implante, como es el caso del titanio, un adecuado posicionamiento de la superficie del implante puede representar reducciones representativas en el volumen de material a maquinar.
- Tiempo de maquinado: al ubicar adecuadamente el implante se reduce el volumen de material a maquinar, y por lo tanto, se reducen las horas-máquina necesarias para obtener la pieza terminada.
- Profundidad crítica de maquinado: no siempre se cuenta con la herramienta requerida para maquinar cavidades profundas. En estos casos, se busca mejorar la posición que represente la menor altura posible a ser maquinada.

Buscando solucionar el problema del posicionamiento se desarrollaron dos aplicaciones en C/C++: una destinada a minimizar el volumen de maquinado y la otra a disminuir la profundidad a maquinar. En ambos casos se utilizó un método heurístico de optimización conocido como *Recocido simulado*. Dicho algoritmo fue propuesto por Kirpatrick, Gelatt y Vechien en 1983, utilizándose desde entonces con éxito en diversos problemas que implican optimización.

En las figuras (9) y (10) se muestran ejemplos de mejoramiento de la posición del implante utilizando estas herramientas.

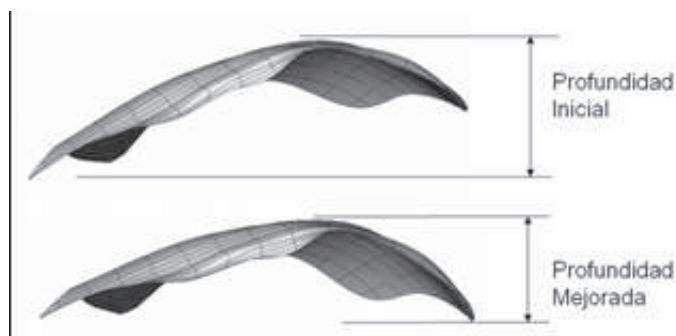


Figura 9: Mejoramiento de la posición del implante para disminuir la profundidad a maquinarse

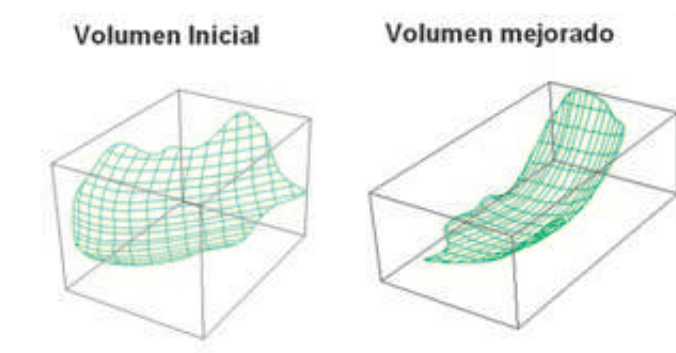


Figura 10: Mejoramiento del volumen mediante el cambio de posición espacial del implante

2. Construcción del montaje: en una herramienta CAD se diseña el montaje para maquinarse el implante. El implante debe quedar unido al montaje por medio de soportes con el fin de poder maquinarse las dos caras del mismo. Los soportes deben ubicarse perpendiculares al contorno del implante, ya que esto permite mayor acceso de la herramienta de corte y, por lo tanto, un mejor maquinado. En la figura (11) se ilustra el diseño de un montaje. El modelo tridimensional obtenido corresponde a la representación de un sólido a partir de la importación de una superficie tipo NURBS (*Non Uniform Rational B-Splines*) desde el sistema CAD modelador de superficies, utilizando un archivo de intercambio tipo IGES y su solidificación en el sistema CAD paramétrico tridimensional. En este punto se define el espesor del implante junto con las venas de soporte y el bloque de apoyo del material (este paso es opcional y puede realizarse desde el CAD de superficies). A partir de este modelo tridimensional sólido, se puede maquinarse en una aplicación CAM, integrada al CAD o mediante la exportación por medio de un archivo de intercambio neutro, tipo IGES o STEP, a un sistema CAM externo a la aplicación CAD.

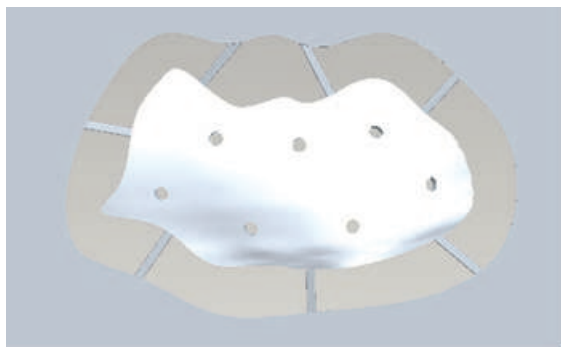


Figura 11: Montaje para maquinar un implante

3. Maquinado del implante: utilizando una herramienta CAM es posible obtener el código de control numérico que permita dirigir el maquinado del implante. Teniendo en cuenta que para la fabricación de un implante se requiere maquinar las dos caras opuestas del material, es necesario dividir el procedimiento en cuatro pasos:
 - (a) Maquinar el implante por un lado.
 - (b) Llenar con un material que aporte resistencia al montaje la cavidad maquinada en el paso anterior.
 - (c) Maquinar el lado opuesto del implante. El resultado de maquinar ambas caras del implante se muestra en la figura (12).
 - (d) Extraído el material de soporte del montaje, se libera el implante cortando los soportes. Finalmente, se pulen las rebabas dejadas por las uniones del implante con los refuerzos.



Figura 12: Implante con maquinado completo

4 Resultados

- Se realizó el análisis de varios programas comerciales para el procesamiento de imágenes médicas tipo DICOM, observando características, operabilidad, formato de información requerida, formatos de salida y/o exportación del programa, facilidades de modelación CAD del programa, facilidad de manejo, costos y aprendizaje. A partir de lo cual se determinó un proceso de selección de la aplicación comercial que mejor cumplía con las necesidades de procesamiento de la información para el diseño del implante.
- Se obtuvo una metodología sólida para el diseño de implantes craneales personalizados utilizando sistemas CAD convencionales y comerciales de bajo costo, disponibles en el medio local. Se logró también desarrollar un procedimiento adecuado para cada una de las zonas del cráneo. Se dispone ahora, por lo tanto, de un procedimiento para el diseño a partir de las imágenes médicas DICOM.
- Se logró desarrollar una aplicación que optimiza el uso del material requerido para el bloque inicial del implante, al encontrar la posición más adecuada, lo que minimiza el uso de materia prima en cuanto a espesor.
- Se obtuvieron, a partir del modelo tridimensional desarrollado en el sistema CAD, las trayectorias para el Centro de Maquinado Vertical de Control Numérico Computarizado, disponible en el Laboratorio de Máquinas Herramientas de la Universidad EAFIT.
- A partir de los códigos generados en el lenguaje de la máquina CNC, se realizó el maquinado de un implante prototipo en una resina poliéster maquinable con el fin de verificar la metodología desarrollada, el acabado superficial, el proceso de maquinado y la secuencia de fabricación.
- El prototipo obtenido aún no es posible implantarlo, dado que no está fabricado en material biocompatible y requiere de verificaciones adicionales.
- Varios elementos se encuentran aún en fase de investigación: precisión del implante obtenido con respecto al defecto original del paciente (análisis dimensional y metrológico), maquinabilidad de materiales biocompatibles, optimización del proceso de fabricación en las máquinas CNC, estudio de implantes de mayor complejidad geométrica, análisis de intercambio de archivos entre aplicaciones, extensión a otras partes del cráneo y del cuerpo, procesos adicionales de manejo y esterilización del implante, entre otros.

5 Conclusiones

El desarrollo de una metodología sólida y aplicable en el diseño y fabricación de implantes craneales, con el soporte de las tecnologías CAD/CAM/CNC, permite hacer más asequibles los implantes de alta calidad y precisión para aquellas personas de menor poder

adquisitivo, gracias a la reducción de los costos que implica la producción local de los mismos.

Adicionalmente, la utilización de las tecnologías CAD/CAM/CNC aporta grandes ventajas comparativas, tanto para el paciente como para el neurocirujano, respecto de otros métodos. La utilización de imágenes DICOM y la reconstrucción de modelos tridimensionales del cráneo permiten obtener implantes precisos, con un excelente ajuste superficial entre el cráneo y el implante. El tiempo de la cirugía disminuye al no tener que intervenir el cirujano en la obtención de la forma del implante, lo que a su vez reduce los riesgos de la intervención, ya que el paciente permanece menos tiempo bajo el efecto de la anestesia, disminuyendo la probabilidad de una complicación durante la intervención.

Por lo tanto, es posible, en el medio local, con las herramientas computacionales comerciales y las máquinas de Control Numérico Computarizado disponibles, la fabricación de este tipo de implantes personalizados. La única aplicación adicional especial que se requiere es un programa para el procesamiento de las imágenes médicas DICOM, el cual es de un alto costo. Las demás aplicaciones CAD y CAM requeridas son de utilización normal en nuestro medio.

Fases posteriores de este proyecto involucran la fabricación en materiales biocompatibles (titanio, polímeros y/o vitrocerámicos) y los estudios requeridos para su implementación, en primera instancia, en animales y, a futuro, en seres humanos.

6 Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Doctor Carlos Jaime Yepes, médico neurocirujano de la Clínica Cardiovascular de Medellín, por sus apreciables sugerencias e indicaciones sobre el tema.

Para este estudio se emplearon los siguientes programas en calidad de demostración o licencia educativa: Analyze, para reconocimiento y reconstrucción de imágenes médicas, de la compañía AnalyzeDirect Inc. [10]; Rhinoceros v3.0, de Robert McNeel [11]; sistema CAD de modelación tridimensional, de su representante en Colombia Bits Ltda. Se agradece a estas compañías la colaboración en el desarrollo del trabajo.

Referencias

- [1] W. Carr y R. Jonathan. *Titanium cranioplasty research*, Cambridge, Inglaterra, <http://mi.eng.cam.ac.uk/jccc/titanium.html>, 1996.
- [2] Cranio Construct Bochum. *Cranio Construct*, Alemania, <http://www.cranioconstruct.de/english/index.htm>, 2001.
- [3] Giancarlo Comi y V. Martinelli. *Correlaciones metabólicas, neurofisiológicas y de imagen*. Alteraciones cognitivas en EM, <http://www.fedem.org/revista/n1/comi.html>, 2003.

- [4] Juan Justo. *La Ciencia y la Ingeniería de los Biomateriales, un Desafío Interdisciplinario*, Revista de Divulgación Científica y Tecnológica de la Asociación Ciencia Hoy, Argentina, <http://www.ciencia-hoy.retina.ar/hoy49/biomat04.htm>, 1998.
- [5] Porex Surgical Products Group. *Cranial Products*, EEUU, <http://www.porexurgical.com/english/surgical/cranialproducts.asp>, 2002.
- [6] Resonancia Magnética S.A. *Acerca de la Resonancia Magnética*, Perú, <http://www.resomasa.com/default.asp?Topic=informes>, 2003.
- [7] The New York City Hospital, *Hoja Informativa: Tomografía Computarizada*, Estados Unidos, <http://www.noahhealth.org/spanish/illness/mentalhealth/cornell/tests/spctscan.html>, 1996.
- [8] University Of Nottingham. *The Dicom Standard*, Inglaterra, <http://www.psychology.nottingham.ac.uk/staff/cr1/dicom.html>, 2003.
- [9] Xavier Vila. *Obtención de Imágenes a Partir de un TC*, España, <http://www.xtec.es/xvila12/index.htm?>, 2003.
- [10] Analyze Direct Inc. *Analyze*, <http://www.analyzedirect.com>, 2003.
- [11] Robert McNeel, Inc. *Rhinoceros 3D*, Estados Unidos, <http://www.rhino3D.com>, 2003.